

ATTENUAZIONE DELL'ONDA D'URTO GENERATA DA UN'ESPLOSIONE IN ARIA MEDIANTE L'USO DI ALCUNI TIPI DI SCHIUME ANTINCENDIO

Adolfo Bacci⁽¹⁾, Santo Petralia⁽²⁾, Giovanni Brandimarte⁽²⁾

⁽¹⁾ XI° G.I. Costruzioni e Tecnologie, Accademia Navale, Viale Italia 52, 57100 Livorno;
Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Facoltà di Ingegneria, Via Diotisalvi 2, 56126 Pisa

⁽²⁾ Commissione Permanente per gli Esperimenti del Materiale da Guerra, MARIPERMAN, Viale San Bartolomeo 400, 19138 La Spezia.

SOMMARIO

In questo articolo vengono presentati alcuni risultati ottenuti di attività sperimentali svolte nell'Istituto di Chimica degli Esplosivi di Mariperman, ente della Marina Militare Italiana a La Spezia, che mostrano la capacità delle schiume antincendio di attenuare gli effetti dell'onda d'urto generata da una esplosione. I risultati confermano che le schiume possono essere utilizzate come un sistema di protezione dell'ambiente nel caso della distruzione, per brillamento, di particolari manufatti esplosivi a rivestimento leggero. Infine, si propone anche un modello teorico per quantificare il fenomeno. Ciò rende possibile la progettazione di barriere di protezione, determinando, in funzione del particolare sito da proteggere ed alla tipologia dell'ordigno da fare brillare, il tipo e lo spessore della schiuma necessari.

1. INTRODUZIONE

Recentemente nella letteratura tecnica sono apparsi studi svolti con lo scopo di valutare la possibilità di attenuare la pressione associata all'onda d'urto, generata da un'esplosione, utilizzando schiume antincendio (ad esempio [1]). Questa capacità è collegata, secondo i vari autori, alle trasformazioni termodinamiche che accompagnano la distruzione della schiuma che circonda l'esplosivo. In particolare, si ritiene che parte dell'energia rilasciata dall'esplosione verrebbe consumata per trasformare la schiuma in minute goccioline d'acqua e per far evaporare le goccioline stesse. E' stato valutato che particolari tipi di schiuma possono ridurre più del 90% la pressione massima generata da un'esplosione. In tale ottica, l'Istituto di Chimica degli Esplosivi di Mariperman a La Spezia ha condotto varie sperimentazioni per quantificare l'interessante fenomeno, usando solo schiume biodegradabili al 100% e classificate come "prodotto non tossico-nocivo".

Una prima serie di prove fu condotta su piccola scala, utilizzando un dispositivo sperimentale molto semplice, in grado di fornire indicazioni qualitative sulla capacità delle schiume di attenuare il picco di pressione generato dalla detonazione di una carica. I risultati lusinghieri, forniti da queste prime indagini, suggerirono di quantificare il fenomeno, proseguendo la sperimentazione in modo più accurato. Pertanto, fu condotta una seconda fase sperimentale in cui furono utilizzate cariche di TNT compresso di peso fino a 180 g. Le misure di pressione furono acquisite con trasduttori di pressione, opportunamente posizionati nel dispositivo sperimentale. Ciò permise di determinare i parametri caratteristici dell'onda d'urto, cioè il massimo valore della pressione, la costante di tempo e l'impulso specifico. Inoltre, modificando le proprietà di alcuni tipi di schiume antincendio si sono potute ottimizzare le "prestazioni" di attenuazione del picco di pressione. Alcune elaborazioni numeriche dei dati sperimentali registrati hanno permesso di prevedere con attendibilità l'efficienza della protezione fino a cariche dell'ordine di 10 kg. Successivi test hanno confermato le previsioni.

La sperimentazione ha permesso così di progettare un sistema applicativo mediante il quale sono stati distrutti, per brillamento, manufatti esplosivi dotati di rivestimento leggero, dopo averli immersi in ambiente schiumoso. I vantaggi ottenuti rispetto ai sistemi tradizionali di bonifica sono stati il drastico abbattimento del picco di pressione, la riduzione notevole degli effetti sonori, la trascurabile proiezione di schegge, il contenimento e la conseguente possibilità dello smaltimento, a norma di legge, dei liquidi e dei fanghi prodotti nel corso delle operazioni di brillamento, minimizzando la diffusione nell'ambiente dei materiali tossici e nocivi che si producono in tali operazioni.

Infine, è stato svolto uno studio teorico per chiarire gli aspetti termo-meccanici che sono alla base del potere protettivo delle schiume. E' stato elaborato così un modello in cui la schiuma veniva simulata come una nube di gas in cui è presente una sospensione acquosa sotto forma di minute goccioline. Dopo aver risolto il problema di gasdinamica che descrive l'espansione della sfera di gas incandescenti prodotti dalla detonazione di una carica, ed aver valutato la quota dell'energia rilasciata dall'esplosione che è assorbita per vaporizzare le goccioline d'acqua, si determina la riduzione di pressione. Le previsioni analitiche sono in accordo con i risultati della sperimentazione. Il risvolto tecnico dell'analisi teorica consiste nel disporre dei mezzi necessari alla progettazione della generica protezione in funzione della tipologia del sito e dell'ordigno da far brillare.

2. LE SCHIUME ANTINCENDIO

Una schiuma può essere definita come un sistema fisico costituito essenzialmente dalla dispersione di un gas, generalmente aria, in una soluzione formata da liquido schiumogeno, detto tensioattivo, ed acqua. I parametri che caratterizzano una schiuma sono i seguenti: la composizione chimica della soluzione usata per

la produzione della schiuma, il rapporto di espansione, indicato nel seguito con RE , che rappresenta il rapporto fra il volume di schiuma prodotto ed il volume della soluzione liquida usata per produrla, il tempo di drenaggio, cioè l'intervallo di tempo necessario a separare il 25% oppure il 50% della soluzione usata per produrre la schiuma.

La composizione chimica ha influenza sul rapporto di espansione, sul tempo di drenaggio e sulla resistenza della schiuma all'attacco chimico da parte di agenti esterni. Il rapporto di espansione RE caratterizza la scorrevolezza e la plasticità della schiuma, mentre il tempo di drenaggio quantifica la maggiore o minore resistenza della schiuma al collasso spontaneo ed agli shock termici.

Le schiume possono essere classificate in funzione del rapporto di espansione. Si distinguono così schiume a bassa espansione, $2 \leq RE \leq 20$, a media espansione, $20 \leq RE \leq 200$, ed infine schiume ad alta espansione, $RE > 200$.

Le schiume trovano attualmente larga applicazione sia nel campo dei detersivi, sia nella prevenzione di incendi di materiali combustibili o nella estinzione di fuochi generati da sostanze infiammabili.

3. LA SPERIMENTAZIONE

La sperimentazione è iniziata con una serie di prove di esplosione aventi solo lo scopo qualitativo di "valutare" le capacità di attenuazione delle schiume. Le prove di scoppio sono state effettuate in una robusta vasca metallica costituita da quattro pareti laterali d'acciaio, munite di cinture di rinforzo, appoggiate su un fondo costituito da una piastra anch'essa d'acciaio. Il dispositivo sperimentale utilizzato e le sue dimensioni sono schematicamente riportate in Figura 1. Il volume della vasca era di circa 1 m^3 . Per valutare gli effetti delle pressioni generate dagli scoppi in assenza oppure in presenza di schiuma, sul fondo della vasca era appoggiato un robusto cilindro d'acciaio, dotato di un foro centrale. Sulla base del cilindro più vicina alla carica veniva posizionato il bersaglio, costituito da una lastra di rame. La carica esplosiva era di tritolo compresso ed era innescata con un detonatore elettrico. Nelle prove in ambiente schiumoso, la vasca era riempita fino ad un livello di 80 cm dal fondo, cosicché il complesso carica-bersaglio era totalmente immerso nel materiale protettivo.

Dopo aver provocato l'esplosione della carica, veniva recuperata la lastra di rame. I parametri di controlli degli effetti dell'esplosione sono stati l'osservazione visiva delle deformazioni permanenti nella zona centrale della lastra di rame e l'eventuale presenza di una tranciatura del contorno della zona deformata. In particolare, quando fu possibile effettuare delle misure è stato calcolato il volume dello svasamento.

Utilizzando il dispositivo sperimentale sopra descritto, sono state condotte prove di scoppio rispettivamente in acqua, aria libera, ed in schiuma di medio e basso rapporto di espansione, $20 \leq RE \leq 50$. Il bersaglio veniva sempre posto alla distanza prefissata di 25 cm dalla carica di tritolo compresso, il cui peso era progressivamente aumentato, durante le serie di scoppi, fino ad ottenere la rottura incipiente del contorno dello svasamento provocato nella lastra di rame. Le varie serie di brillamenti avevano lo scopo di provare che il materiale di riempimento della vasca riduceva la pressione massima dell'onda d'urto. Venne così determinato il peso di carica necessario per produrre sul bersaglio effetti meccanici "visivamente" simili, paragonando in modo qualitativo l'intensità delle sovrappressioni causate dagli scoppi. Si è ottenuto che i pesi "equivalenti" delle cariche di TNT compresso erano i seguenti: 10 g in acqua, 25 g in aria, 50 g in una schiuma con $RE = 50$, mentre la carica è salita fino a 140 g se il riempimento era una schiuma con $RE=20$.

Successivamente, sono state eseguite delle prove di scoppio variando il rapporto di espansione delle schiume, ma utilizzando sempre il medesimo peso di carica, 25 g, e posizionando il bersaglio ancora a 25 cm dall'esplosivo. Lo scopo era quello di verificare, in prima approssimazione, l'esistenza di una relazione tra il tipo di schiuma utilizzato, definito dal suo rapporto di espansione, e le caratteristiche dell'onda d'urto che

raggiungeva il bersaglio. Il parametro di confronto era ancora il volume della zona deformata del bersaglio. In queste prove, si è evidenziato ancora di più il potere assorbente della schiuma. Infatti, si è accertato che, diminuendo il rapporto di espansione, ovvero arricchendo le schiume di acqua, l'efficacia protettiva aumentava. E' importante osservare che le conclusioni sono valide entro i limiti della sperimentazione effettuata, cioè per rapporti d'espansione compresi nell'intervallo $18 \leq RE \leq 180$. Si può ragionevolmente ritenere che esista, per $RE < 18$, un rapporto RE_{ott} ottimale, in corrispondenza del quale si ha la massima efficacia protettiva della schiuma. Invece, se $RE < RE_{ott}$, è intuibile che vi sia una riduzione della capacità di attenuazione, poiché la schiuma diviene troppo ricca di acqua. Infatti, è stato osservato che nelle prove in cui l'acqua è il solo mezzo di riempimento della vasca, mantenendo invariati gli altri fattori, si ha la massima deformazione del bersaglio.

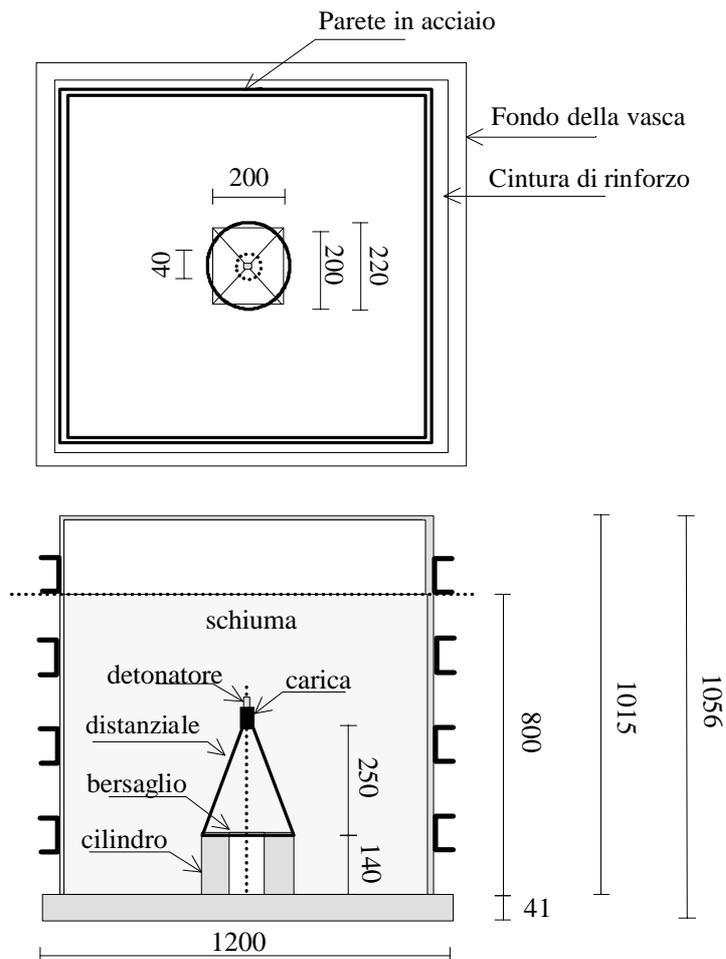


Figura 1. Il sistema di prova

L'influenza del tempo di drenaggio sull'efficienza protettiva della schiuma è stata valutata facendo esplodere la carica dopo circa 45 minuti dall'immissione della schiuma nella vasca. L'effetto di drenaggio della schiuma si è rivelato poco significativo sulla sua capacità di attenuazione dell'onda di pressione, almeno per tempi non superiori a quelli di prova. Infine, sono state effettuate le prove pratiche di scoppio normalmente utilizzate dall'Istituto di Chimica degli Esplosivi di Mariperman per la qualificazione degli esplosivi. A tale scopo è stata effettuata la prova chiamata "Dent Test", che viene eseguita per classificare un esplosivo dal punto di vista della dirompenza. Essa consiste nel far esplodere una carichetta cilindrica dell'esplosivo in esame, il cui peso è 25 g, dopo averla appoggiata sul centro della superficie di una piastra di

piombo. La misura del volume dell'impronta che rimane sulla lastra caratterizza la dirompenza. Si è così osservato che la schiuma non produceva alcun genere di intasamento, poiché le impronte osservate erano pressoché identiche sia in assenza, sia in presenza di schiuma. Ciò significa che la schiuma ha solamente assorbito l'energia dell'onda d'urto che si è propagata nell'ambiente circostante, riducendo drasticamente anche gli effetti acustici e di soffio.

La seconda fase delle prove è stata predisposta per quantificare l'efficienza protettiva delle schiume. Nel dispositivo di prova la lastra di rame è stata sostituita con dei trasduttori di pressione. La catena di misura è stata completata inserendo un amplificatore di carica ed un oscillografo, capace di registrare transitori dinamici molto rapidi. Il segnale acquisito ha permesso di determinare la pressione massima, la costante di tempo e l'impulso specifico. Ciò è stato possibile perché la pressione associata ad un'onda d'urto si suppone variabile nel tempo t con la relazione $P(t) = P_{\max} e^{-t/\theta}$, in cui θ è la costante di tempo. Quest'ultima è definita come il tempo necessario per ridurre la pressione massima P_{\max} di $1/e$, ovvero del 37% circa. Invece, l'impulso specifico, che rappresenta l'area della curva $P = P(t)$, è espresso dalla relazione

$$I = \int_0^{\infty} P(t) dt \cong \int_0^{6.7\theta} P(t) dt.$$

In questa fase della sperimentazione, partendo inizialmente da cariche di 25 g di TNT compresso, poste a 25 cm dal trasduttore, variando il tipo di schiuma in funzione del rapporto di espansione nell'intervallo $7 \leq RE \leq 60$, si è misurato un aumento della costante di tempo da 20 μs in aria libera a circa 900 μs in presenza di schiuma. L'impulso specifico in aria è risultato amplificato di un fattore tre rispetto a quello calcolato per le schiume. I massimi valori misurati per la pressione sono passati da 210 kg/cm^2 in aria libera ad un minimo di 1,5 kg/cm^2 , per schiume con $RE = 7$, fino al massimo di 4,27 kg/cm^2 , per una schiuma con $RE = 60$. In particolare, è stata chiarita anche la dipendenza della pressione massima dal peso W della carica, espresso in grammi, e dalla distanza R del bersaglio, espressa in centimetri, mediante il rapporto $\overline{R} = R/\sqrt[3]{W}$, chiamato "distanza ridotta".

Nell'ambito della seconda sperimentazione, è stata confermata la durata nel tempo delle proprietà di attenuazione della schiuma. Infatti, il brillamento di una carica di tritolo compresso di 25 g dopo 15 ore dalla messa in opera della schiuma ha prodotto pressioni analoghe a quelle misurate quando la carica esplose immediatamente dopo l'immissione della schiuma.

Una terza fase di prove è stata ulteriormente effettuata con cariche di peso variabile da 0,5 Kg a 10 Kg, dopo avere, preliminarmente, eseguito delle prove campione con lo scopo di testare l'efficienza e la sicurezza delle apparecchiature sperimentali, fortemente sollecitate dalle notevoli pressioni generate negli scoppi. L'acquisizione dei dati sperimentali è stata però limitata a cariche di peso variabile da 6 Kg e a 10 Kg.

In questa fase il dispositivo di prova è stato rinforzato, usando una vasca in cui era stata posta un'incastellatura metallica cubica, di dimensioni 4x4x4 m, chiusa con fogli di politene. Sul fondo della vasca, in posizione centrale, era stata posta una piastra di ferro sulla quale poggiava il cilindro di piombo, dentro il quale era posizionato il trasduttore di pressione. La schiuma utilizzata aveva un rapporto di espansione $RE = 12$. Il metodo di misura, del tutto analogo a quello già descritto nella precedente fase sperimentale, ha consentito di ottenere le seguenti misure di pressione. Per la carica di 6 kg. posta alla distanza di 150 cm dal trasduttore, cioè con una distanza ridotta $\overline{R} = 8,25$, la pressione massima è stata di 2.50 kg/cm^2 , mentre per la carica di 10 kg, distante 180 cm dal sensore di pressione, per cui $\overline{R} = 8,35$, la sovrappressione era di 15 kg/cm^2 . Inoltre, dai risultati ottenuti nella seconda serie di prove emerge che la pressione in aria libera per la carica di 25 g alla distanza di 25 cm, $\overline{R} = 8,77$, era di 210 kg/cm^2 . Inoltre, considerando prove sperimentali simili, tutte quelle caratterizzate dalla medesima "distanza ridotta", le cadute di pressione prodotte dalla presenza della schiuma sono riportate nella Tabella 1.

Peso (g)	Distanza (cm)	$R = R/\sqrt{W}$	P_{max} (kg/cm ²)	$\frac{P_{aria} - P_{max}}{P_{aria}} \cdot 100$
25,00	25,00	8,77	4,50	98 %
6000,00	150,00	8,25	2,50	99 %
10000,00	180,00	8,35	15,00	93 %

Tabella 1. Riduzione del picco di pressione.

Si può quindi concludere che la schiuma ha assorbito dal 93% al 99% della pressione massima generata nell'esplosione di cariche di tritolo compresso di peso variabile da 25 g a 10.000 g.

5. IL MODELLO TEORICO

La sperimentazione ed i risultati ottenuti consentono di affermare che la dinamica del fenomeno è legata all'assorbimento dell'energia d'esplosione durante il moto dell'onda d'urto da parte delle singole celle di schiuma, della conseguente formazione delle microparticelle d'acqua e della successiva vaporizzazione dell'acqua stessa. Ciò risulta in accordo con la maggiore capacità di assorbimento di schiume a basso rapporto di espansione, che contengono un maggior numero di cellette ed una maggiore quantità di acqua. Il meccanismo spiega anche gli effetti provocati da cariche detonate a contatto con il bersaglio in aria o sotto un battente di schiuma. Infatti, la schiuma non costituisce un ostacolo che provoca intasamento, aumentando l'azione dirompente verso il bersaglio, bensì si limita ad assorbire una quota dell'energia liberata nell'esplosione non trasmettendola all'ambiente circostante.

In base alle osservazioni precedenti si può costruire un modello semplice con cui controllare quantitativamente il fenomeno.

L'esplosione si consideri puntuale ed istantanea con un rilascio noto di energia, che verrà indicata con E . Le trasformazioni termodinamiche, vista la rapidità del fenomeno sono da ritenersi adiabatiche. La schiuma, composta da bollicine che una volta compresse dall'onda di pressione si riducono a microparticelle di liquido, è schematizzata come una nube di gas contenente una concentrazione nota di particelle sospese. La concentrazione delle particelle può essere molto elevata, in funzione del rapporto d'espansione della schiuma. Ad esempio, in schiume con $RE \sim 10$, la quantità d'acqua raggiunge il valore di $\sim 91 \text{ kg/m}^3$. L'acqua dispersa nella schiuma viene istantaneamente vaporizzata interagendo con la bolla dei gas d'esplosione ad alta temperatura, togliendo parte dell'energia disponibile al moto dell'onda di pressione, che come conseguenza rallenta la sua velocità di propagazione e diminuisce il valore della pressione massima sul fronte d'onda. Inoltre, in prima approssimazione, si suppongono trascurabili l'influenza della diffusione termica, della radiazione elettromagnetica e della viscosità, rispetto alla perdita d'energia per vaporizzare le particelle d'acqua. In queste ipotesi, possono essere utilizzati i risultati delle analisi di Sedov [2] per la cosiddetta *strong explosion*.

Consideriamo la propagazione di un'onda d'urto generata da un'esplosione che rilascia istantaneamente una quantità d'energia E in un piccolo volume. Il gas in cui l'onda si propaga sarà considerato politropico. Nel seguito si converrà di indicare con il pedice "1" il gas indisturbato, mentre il pedice "2" rappresenterà il gas perturbato dal passaggio dell'onda d'urto, infine con l'apice " ' " si indicherà il gas contenente le particelle d'acqua. Detta p_2 la pressione nel gas dopo il passaggio del fronte d'onda, supponiamo che essa sia molto grande rispetto alla pressione p_1 , ad esempio quella atmosferica, del mezzo indisturbato non ancora investito dall'onda di pressione.

In queste ipotesi, il flusso del gas è individuato da due soli parametri. La densità del gas iniziale ρ_1 e l'energia rilasciata nell'esplosione. Da questi parametri e dalle due variabili indipendenti, cioè la distanza

radiale r ed il tempo t , si può formare una sola combinazione adimensionale, che verrà indicata con $r(\rho_1/Et^2)^{1/5}$. La posizione del fronte d'onda è individuata pertanto dalla relazione

$$r_2 = \beta \left(\frac{Et^2}{\rho_1} \right)^{1/5}, \quad (1)$$

dove β è una costante adimensionale che dipende solo dal rapporto γ fra i calori specifici a pressione costante, c_p , ed a volume costante, c_v , del gas, cioè $\beta = \beta(\frac{c_p}{c_v}) = \beta(\gamma)$. La costante β sarà determinata esplicitamente dalla soluzione delle equazioni del moto.

La velocità del fronte d'onda, relativa al gas indisturbato, diviene

$$U = \frac{dr_2}{dt} = \frac{2r_2}{5t} = \frac{2}{5} \beta \left(\frac{E}{\rho_1} \right)^{1/5} t^{3/5}. \quad (2)$$

Le condizioni che permettono di determinare la pressione e la densità nel gas "2", dopo il passaggio del fronte d'onda, sono le classiche condizioni di conservazione della massa che fluisce attraverso il fronte, della quantità di moto e la conservazione dell'energia. Nell'ipotesi che il gas fosse originariamente a riposo e $p_2 \gg p_1$, si ottengono le equazioni di Rankine-Hugoniot

$$\begin{aligned} \rho_1 U &= \rho_2 (U - v_2), \\ \rho_1 U^2 &= \rho_2 (U - v_2)^2 + p_2, \\ \frac{1}{2} U^2 &= \frac{1}{2} (U - v_2)^2 + \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1} \right) \frac{p_2}{\rho_2}, \end{aligned} \quad (3)$$

dalle quali si ottiene

$$v_2 = \frac{2U}{\gamma + 1}, \quad \rho_2 = \rho_1 \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1}, \quad p_2 = \frac{2U^2}{\gamma + 1} \rho_1. \quad (4)$$

Le relazioni (4) mostrano che la densità è costante nel tempo, mentre $v_2 \sim t^{-3/5}$, $p_2 \sim t^{-6/5}$. Si noti che la pressione sul fronte d'onda dipende dall'energia d'esplosione in ragione di $E^{2/5}$.

Per determinare il moto del gas nella sfera perturbata si devono utilizzare le equazioni locali di bilancio meccanico delle forze, della conservazione della massa e, nel caso di evoluzione adiabatica, della conservazione dell'entropia. Si hanno le seguenti equazioni differenziali

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} v + v \frac{\partial}{\partial r} v &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial r} p, \\ \frac{\partial}{\partial t} \rho + \frac{\partial}{\partial r} (\rho v) + 2 \frac{\rho v}{r} &= 0, \\ \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) + v \frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{p}{\rho^\gamma} \right) &= 0, \end{aligned} \right. \quad (5)$$

da associare alle condizioni (4) scritte sulla frontiera mobile, ed alla condizione di conservazione dell'energia totale

$$E = \int_0^{r_2} \rho \left[\frac{1}{2} v^2 + \frac{p/\rho}{\gamma - 1} \right] 4\pi r^2 dr. \quad (6)$$

Ponendo

$$v(r, t) = \frac{2}{5} \frac{r}{t} V(\xi), \quad \rho(r, t) = \rho_1 G(\xi), \quad p(r, t) = \frac{4}{25} \frac{\rho_1}{\gamma} \left(\frac{r}{t} \right)^2 G(\xi) Z(\xi) \quad (7)$$

dove $\xi = r/r_2(t)$, ed osservando che sulla superficie di discontinuità si hanno le condizioni

$$V(1) = 2/(\gamma + 1), \quad G(1) = (\gamma - 1)/(\gamma + 1), \quad Z(1) = 2\gamma(\gamma - 1)/(\gamma + 1)^2, \quad (8)$$

dalla sostituzione nelle equazioni del moto delle (5) si ricavano le seguenti espressioni delle funzioni $V(\xi)$, $Z(\xi)$ e $G(\xi)$

$$\begin{aligned} \xi^5 &= \left[\frac{1}{2}(\gamma + 1)V(\xi) \right]^{-2} \left\{ \frac{\gamma + 1}{7 - \gamma} [5 - (3\gamma - 1)V(\xi)] \right\}^{n_1} \left\{ \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} [V(\xi)\gamma - 1] \right\}^{n_2}, \\ G(\xi) &= \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \left\{ \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} [V(\xi)\gamma - 1] \right\}^{n_3} \left\{ \frac{\gamma + 1}{7 - \gamma} [5 - (3\gamma - 1)V(\xi)] \right\}^{n_4} \left\{ \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} [1 - V(\xi)] \right\}^{n_5}, \\ Z(\xi) &= \frac{\gamma(\gamma - 1)[1 - V(\xi)]V^2(\xi)}{\gamma[V(\xi)\gamma - 1]}, \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{con } n_1 = -\frac{13\gamma^2 - 7\gamma + 12}{2 - \gamma}, \quad n_2 = \frac{5(\gamma - 1)}{2\gamma - 1}, \quad n_3 = \frac{3}{2\gamma + 1}, \quad n_4 = -\frac{n_1}{2 - \gamma}, \quad n_5 = \frac{2}{2 - \gamma}$$

Le precedenti espressioni (9) danno la soluzione completa del problema della propagazione dell'onda d'urto generata da un'esplosione. La costante β è determinata dalla condizione di conservazione dell'energia totale (6). Infatti, sostituendo le espressioni (7) nella (6), si ricava la relazione funzionale

$$\beta^5 \frac{16\pi}{25} \int_0^1 G(\xi) \left[\frac{1}{2} V^2(\xi) + \frac{Z(\xi)}{\gamma(\gamma - 1)} \right] \xi^4 d\xi = 1, \quad (10)$$

che permette di ricavare la costante β . In particolare, per $\gamma = 1,4$ (aria), si ricava $\beta = 1,033$.

La schiuma viene simulata come un gas contenente un grande numero di piccole particelle liquide. La densità delle particelle sospese può essere anche molto grande ed è ragionevole assumere che le particelle sospese nel gas incrementino l'inerzia del mezzo, la cui densità diviene $\rho' = \rho(1 + k)$ dove ρ è la densità del gas e k è una costante positiva, che dipende dalla concentrazione del liquido sospeso.

In questo caso il sistema delle equazioni della gasdinamica per il moto adiabatico deve essere modificato includendovi la nuova densità $\rho' = \rho(1 + k)$ e il nuovo coefficiente politropico γ' .

A tale scopo, consideriamo la condizione di adiabaticità per il gas con sospensione liquida. Essa prende la forma

$$\rho c_v dT + ck\rho dT + \rho' p d(1/\rho') = 0, \quad (11)$$

dove c è la capacità termica delle particelle, assunta costante, e c_v è il calore specifico a volume costante del gas. L'integrazione dell'equazione precedente, dopo aver posto $dT = [pd(1/\rho') + 1/\rho' dp]/(nR)$, in cui n è il numero di moli ed R è la costante dei gas, conduce alla seguente espressione $p' = A\rho'^{(c_p + kc)/(c_v + kc)}$ in cui A è una costante dipendente dalle caratteristiche delle particelle sospese del mezzo. L'espressione $(c_p + kc)/(c_v + kc)$ sarà indicata nel seguito con γ' .

Questo artificio permette di riscrivere le equazioni (5) per il gas con particelle sospese, sostituendo le quantità ad ρ e γ dell'aria con le corrispondenti ρ' e $\gamma' = c'_p/c'_v$, in cui $c'_p = (c_p + kc)/(1 + k)$. In particolare,

la variazione $d\varepsilon$ della densità $\varepsilon(T)$ dell'energia interna dell'aerosol, causata da un incremento dT di temperatura, risulta $\rho(1+k)d\varepsilon = \rho c_v dT + \rho k c dT$. Integrando la relazione precedente, si ottiene l'espressione

$$\varepsilon = \frac{c_v + kc}{1+k} T = c'_v T = \left(\frac{1}{\gamma' - 1} \right) \frac{p}{\rho'}, \quad (12)$$

ovvero la condizione $1 < \gamma' < \gamma$. Si osservi che, quando kc cresce, e ciò accade quando la capacità termica oppure la concentrazione di liquido aumentano, allora $\gamma' \rightarrow 1$.

Le condizioni di discontinuità sul fronte d'onda d'urto rimangono invariate, dopo la sostituzione della nuova densità e del nuovo rapporto politropico. Per cui, se prendiamo in esame la pressione generata da una forte esplosione che rilascia un ammontare di energia E , la pressione sul fronte d'onda, nel caso di presenza di particelle di sospensione, risulta

$$p'_2 = \frac{2U'^2}{\gamma' + 1} \rho'_1, \quad (13)$$

per cui il fattore di attenuazione diviene

$$K_{rid} = \frac{p'_2}{p_2} = \frac{\gamma + 1}{\gamma' + 1} \left(\frac{\rho'_1}{\rho_1} \right) \left(\frac{U'}{U} \right)^2 = \frac{\gamma + 1}{\gamma' + 1} \left(\frac{\beta'}{\beta} \right)^2,$$

che dipende solo dai rapporti politropici dell'aria e dell'aerosol.

In particolare, nel caso di una schiuma in cui il coefficiente k è elevato, per cui il prodotto $kc \rightarrow \infty$, linearizzando l'espressione di γ' al variare del parametro $1/kc$, e ricordando che $R = c_p - c_v$ è la costante dei gas, si ottiene

$$\gamma' = \frac{c_p + kc}{c_v + kc} = \frac{1 + c_p/kc}{1 + c_v/kc} \approx (1 + c_p/kc)(1 - c_v/kc) = 1 + \frac{R}{kc}. \quad (14)$$

Le funzioni $V(\xi)$, $G(\xi)$ e $Z(\xi)$, dopo aver osservato che dalla (8.a) risulta $1/\gamma \leq V(\xi) \leq 2/(1+\gamma)$, ponendo $\alpha = R/kc$, hanno le espressioni linearizzate

$$V(\xi) \approx 1 - 3\alpha/4, \quad G(\xi) \approx 2/(3\alpha), \quad Z(\xi) \approx 3\alpha/2, \quad (15)$$

dalle quali si ottiene il coefficiente di scala

$$\beta' \approx \alpha^{1/5} \left(\frac{75}{16\pi} \right)^{1/5} \cong \left(\frac{R}{kc} \right)^{1/5}. \quad (16)$$

Quando il gas base è l'aria, per la quale è $\gamma = 1,4$ e $\beta = 1,033$, il coefficiente di riduzione dell'intensità della pressione diviene

$$K_{rid} = \frac{\gamma + 1}{\gamma' + 1} \left(\frac{\beta'}{\beta} \right)^2 \approx 1,2 \left(\frac{R}{kc} \right)^{2/5}. \quad (17)$$

Inoltre, sostituendo nell'equazione (17) i valori tecnici della costante dei gas R e del calore specifico dell'acqua, si ha

$$K_{rid} \sim 0.5/k^{2/5}, \quad (18)$$

dalla quale, ponendo $k = 1000/(1 + RE)$, abbiamo

$$K_{rid} = 0.03(1 + RE)^{0.4}. \quad (19)$$

Nella Figura 2 si illustra la dipendenza del fattore di riduzione del picco di pressione dal rapporto d'espansione della schiuma. I risultati si accordano con buona precisione alle osservazioni sperimentali. L'analisi quantitativa che permette di valutare l'incremento della costante di tempo, qui omessa per ragioni di brevità, porta ancora a risultati in buon accordo con osservazioni delle esperienze già descritte.

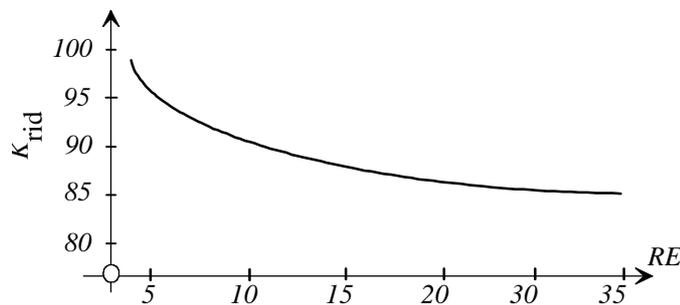


Figura 2. La relazione $K_{rid} = K_{rid}(RE)$.

6. CONCLUSIONI

Le schiume antincendio presentano notevoli e valide caratteristiche di attenuazione delle pressioni generate dalle esplosioni. Qualora vengano risolti alcuni problemi pratici inerenti sia la preparazione in breve tempo di consistenti quantità di schiuma, sia il facile e rapido posizionamento in adatti contenitori, esse si potrebbero utilizzare in particolari situazioni operative come volate di mine, prove su cariche sperimentali, oppure distruzione di ordigni inesplosi ed inamovibili. La metodologia appare particolarmente utile sia in campo industriale, sia in altri particolari settori, come ad esempio le procedure antiterroristiche. Infine, il modello teorico sviluppato, oltre a chiarire alcuni aspetti della meccanica del fenomeno, consente di progettare tecnicamente barriere di protezione, permettendo di scegliere l'opportuno tipo di schiuma in funzione della tipologia del sito e da proteggere e dell'ordigno da far brillare.

7. BIBLIOGRAFIA

[1] M. E. Larsen, Aqueous foam mitigation of confined blasts, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 34, pp. 409-418 (1992)

[2] L.D. Landau, E. M. Lifshitz, *Fluid Mechanics*, Pergamon Press, Oxford, pp. 403-406 (1987).